

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2007～2008

課題番号：19204022

研究課題名（和文） 太陽 CNO サイクルニュートリノの実時間測定

研究課題名（英文） Real time measurement of solar CNO cycle neutrinos

研究代表者

井上 邦雄（INOUE KUNIO）

東北大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：10242166

研究成果の概要：

太陽表面組成を再現できる標準太陽模型が予測する太陽内の密度構造は、太陽震動学的な観測結果と矛盾しており（太陽組成問題）、太陽中心の C,N,O 存在量を直接的に制限できる太陽 CNO サイクルニュートリノ観測の重要性が増している。宇宙線による原子核破砕で生成される C11 はこの観測の深刻なバックグラウンドであるが、同時生成される中性子を識別することで 20 分の 1 に低減できる。その際必須となる不感時間のない電子回路を開発した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	6,700,000	2,010,000	8,710,000
2008 年度	26,800,000	8,040,000	34,840,000
年度			
年度			
年度			
総計	33,500,000	10,050,000	43,550,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：太陽ニュートリノ、CNO サイクル、デッドタイムフリー電子回路

## 1. 研究開始当初の背景

カムランド液体シンチレータ中の放射性不純物を除去するシステムが完成し、数桁におよぶバックグラウンド低減の取り組みを開始した。この取り組みにより低エネルギー太陽ニュートリノの観測が見込まれたが、太陽組成問題解決に最も有効である CNO サイクルニュートリノの観測には、宇宙線起源の C11 が深刻なバックグラウンドなることが予想されており、このバックグラウンドを低減する技術・手法の開発が不可欠であった。

## 2. 研究の目的

(1) 低エネルギー太陽ニュートリノ観測のエネルギー領域にバックグラウンドを作る放射性希ガスおよび放射性重元素を 4～5 桁低減する。

(2) ミューオン通過後の光電子増倍管のオーバーシュートを抑制し、C11 と同時に生成される中性子信号を明確にする。

(3) ミューオン後に作られる信号を不感時間

なく全て取得するための高速高性能電子回路を開発する。

(4) 中性子捕獲信号の識別により、C11 を効率的に除去する解析手法を確立する。

### 3. 研究の方法

(1) 1000 立方メートルの液体シンチレータを貯蔵できるバッファがないため、蒸留による純化作業は循環しながら行う。その際、純化前後の液体が混合してしまうと純化効率が極端に低下してしまうため、液体シンチレータを内包する容器に負荷をかけない範囲で密度を微調整することで、新旧液体の層構造を作り、純化の効率化を行う。

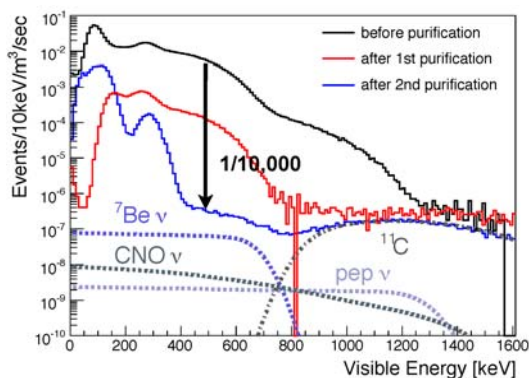
(2) 長い時定数のオーバーシュートを選別し、差し引くことで、ミュオン後のベースラインを安定化させ、中性子捕獲信号をクリアにする。

(3) 1G サンプル毎秒の高速フラッシュ ADC と 3つの 200M サンプル毎秒のフラッシュ ADC を組み合わせ各光電子増倍管に接続することで、広帯域高速のデジタル変換を実現する。さらに、FPGA 内に形成する大容量のメモリと組み合わせ、ゼロサプレッスや信号処理を組み合わせることでデッドタイムフリーを実現する。

(4) 既存の電子回路を使って、取り込み可能な範囲内で中性子捕獲信号による C11 の識別を行い、C11 生成頻度の測定し、識別手法を確立する。

### 4. 研究成果

(1) 超高純度窒素による窒素パージ及び精密蒸留を延べ4巡にわたり実施し、放射性希ガスおよび放射性重元素を10000分の1以下に低減することに成功した。これにより、CNO サイクルニュートリノ領域のバックグラウンドは、ほぼ C11 のみとなった。



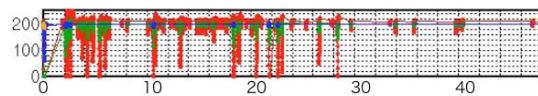
(2) 光電子増倍管の信号入力に対し、ベースライン安定化出力と、無補正の出力の両方を持たせることで、既存電子回路と新規開発のデッドタイムフリー電子回路の同時運用が可能となった。信号安定化回路では巨大なミュオン信号後も1.4マイクロ秒以内にベースラインを安定化させることに成功した。また、全数調達を完了した。



(3) 9U の VME 基盤に 12ch を高密度に組み込んだ広帯域高速デッドタイムフリー電子回路の開発に成功し、全数を調達した。10 マイクロ秒という長いバッファを有することで、FPGA 内蔵の新開発トリガモジュールと組み合わせ、信号の前後に低いしきい値を設定するなどの高度なトリガ条件が実現可能となった。



また、ミュオン後の大量のアフターパルスも含めデッドタイムフリーでデータを取得できることを確認した。



(4) 既存の電子回路を用い、宇宙性ミュオンによる原子核破碎反応で生成される放射性元素の生成率を網羅的に測定することに成功した。これらの中で特に C11 は CNO サイクルニュートリノの観測、C10 はカムランドで計画中のキセノンを用いたニュートリノレス二重β崩壊のバックグラウンドとなるが、ともに中性子も同時に生成するため、新規開発した電子回路により 20 分の 1 に低減可能である。

また、ミュオン・中性子・C11 の同時計測による識別手法を確立し、デッドタイムのある既存回路で 3 分の 1 に低減（有効観測時間

50%) することに成功した。

	Yield ( $\times 10^{-7} \mu^{-1} \text{g}^{-1} \text{cm}^2$ )		
	Hagner et al.	FLUKA calc.	This measurement
$n$	–	$2097 \pm 13$	$2787 \pm 311$
$^{12}\text{B}$	–	$27.8 \pm 1.9$	$42.9 \pm 3.3$
$^{12}\text{N}$	–	$0.77 \pm 0.08$	$1.8 \pm 0.4$
$^8\text{Li}$	$1.9 \pm 0.8$	$21.1 \pm 1.4$	$12.2 \pm 2.6$
$^8\text{B}$	$3.3 \pm 1.0$	$5.77 \pm 0.42$	$8.4 \pm 2.4$
$^9\text{C}$	$2.3 \pm 0.9$	$1.35 \pm 0.12$	$3.0 \pm 1.2$
$^8\text{He}$	$1.0 \pm 0.3$	$0.32 \pm 0.05$	$0.7 \pm 0.4$
$^9\text{Li}$		$3.16 \pm 0.25$	$2.2 \pm 0.2$
$^{11}\text{C}$	$421 \pm 68$	$416 \pm 27$	$866 \pm 153$
$^{10}\text{C}$	$54 \pm 12$	$19.1 \pm 1.3$	$16.5 \pm 1.9$
$^{11}\text{Be}$	$<1.1$	$0.84 \pm 0.09$	$1.1 \pm 0.2$
$^6\text{He}$	$7.5 \pm 1.5$	$12.08 \pm 0.83$	–
$^7\text{Be}$	$107 \pm 21$	$105.3 \pm 6.9$	–

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 9 件)

- (1) S.Enomoto (3/82), H.Ikeda (7/82), K.Inoue (8/82), (KamLAND collaboration), “Precision Measurement of Neutrino Oscillation Parameters with KamLAND”, Phys.Rev.Lett. 100: 221803, 2008. (査読有)
- (2) S.Enomoto, E.Ohtani, K.Inoue, A.Suzuki, “Neutrino Geophysics with KamLAND and Future Prospects”, Earth and Planetary Science Letters 258 (2007) 137-159. (査読有)
- (3) K.Inoue (129/145), (Super-Kamiokande collaboration), “Solar neutrino measurements in Super-Kamiokande-II”, Phys.Rev.D78:032002, 2008. (査読有)
- (4) K.Inoue (126/138), (Super-Kamiokande collaboration), “Study of TeV neutrinos with upward showering muons in Super-Kamiokande”, Astropart.Phys.29:42-54, 2008. (査読有)
- (5) K.Inoue (112/125), (Super-Kamiokande collaboration), “Search for matter-dependent atmospheric neutrino oscillations in Super-Kamiokande”, Phys.Rev.D77:052001, 2008. (査読有)
- (6) K.Inoue (125/143), (Super-Kamiokande collaboration), “Search for Supernova Neutrino Bursts at Super-Kamiokande”, Astrophys.J.669:519-524, 2007. (査読有)
- (7) K.Inoue (122/136), (Super-Kamiokande collaboration), “Search for neutral Q-balls in Super-Kamiokande II”, Phys.Lett.B647:18-22,

2007. (査読有)

- (8) K.Inoue (107/121), (Super-Kamiokande collaboration), “Observation of the anisotropy of 10-TeV primary cosmic ray nuclei flux with the Super-Kamiokande-I detector”, Phys.Rev.D75:062003, 2007. (査読有)
- (9) K.Inoue, H.Minakata, “Neutrino Physics around MeV energies”, Nucl. Proc. Suppl. 168: 389-394, 2007. (査読有)

[学会発表] (計 3 3 件)

1. 米澤栄斉、「カムランド太陽ニュートリノ観測のためのデッドタイムフリー電子回路 MoGURA の開発 III: システムデザイン及びトリガ基板の設計開発」、日本物理学会、2009.3.28、立教大学
2. 竹本康浩、「カムランド太陽ニュートリノ観測のためのデッドタイムフリー電子回路 MoGURA の開発 VI: KamLAND における実試験と全数評価」、日本物理学会、2009.3.28、立教大学
3. 榎本三四郎、「汎用データ収集システム KiNOKO の最近の発展」、日本物理学会、2009.3.28、立教大学
4. 寺島亜寿紗、「KamLAND を用いた二重ベータ崩壊実験 2-現在の開発状況-」、日本物理学会、2009.3.27、立教大学
5. 森川拓矢、「液体シンチレータによる反電子ニュートリノ方向検出法の開発 I」、日本物理学会、2009.3.27、立教大学
6. 高橋永、「液体シンチレータによる反電子ニュートリノ方向検出法の開発 II」、日本物理学会、2009.3.27、立教大学
7. Y.Gando, “KamLAND: Updated Results and Future Prospect”, Asia Science Seminar on Frontier Science at High-Intensity Proton Accelerators, 20 October 2008, Beijing, China.
8. A.Suzuki, “History of Neutrino Telescope/Astronomy”, 400 years of Astronomical Telescopes, 30 September 2008, Noodrwijk, Netherlands.
9. 寺島亜寿紗、「KamLAND を用いた二重ベータ崩壊実験について」、日本物理学会、2008.9.21、山形大学
10. 渡辺寛子、「反ニュートリノの方向測定に向けたリチウム含有液体シンチレータの

- 開発」、日本物理学会、2008.9.21、山形大学
11. I.Shimizu, “KamLAND Results”, Neutrino Oscillation Workshop 2008, 8 September 2008, Otranto, Italy.
  12. Y.Gando, “KamLAND: updated results and future plan”, Fundamental Physics using Atoms, 19 August 2008, Sendai, Japan.
  13. J.Shirai, “New KamLAND Results”, IV International Workshop on Neutrino Oscillations in Venice, 17 April 2008, Venice, Italy.
  14. 吉田 斉、「KamLAND 実験の現状」、日本物理学会、2008.3.25、近畿大学
  15. 榎本三四郎、「カムランド太陽ニュートリノ観測のためのデッドタイムフリー電子回路MoGURAの開発1：設計と製造」、日本物理学会、2008.3.25、近畿大学
  16. 竹本康浩、「カムランド太陽ニュートリノ観測のためのデッドタイムフリー電子回路MoGURAの開発2：動作検証と性能評価」、日本物理学会、2008.3.25、近畿大学
  17. 中島恭平、「KamLAND 実験における低エネルギー太陽ニュートリノ観測へ液体シンチレータの純化によるバックグラウンドの低減へ」、日本物理学会、2008.3.24、近畿大学
  18. 寺島亜寿紗、「KamLAND における Double beta decay 実験の可能性について」、日本物理学会、2008.3.24、近畿大学
  19. 嶺川幸江、「KamLAND 実験における原子炉反ニュートリノの解析1」、日本物理学会、2008.3.23、近畿大学
  20. 清水百合、「KamLAND 実験における原子炉反ニュートリノの解析2-系統誤差の改善」、日本物理学会、2008.3.23、近畿大学
  21. 岐部佳朗、「KamLAND 実験における原子炉反ニュートリノの解析3」、日本物理学会、2008.3.23、近畿大学
  22. 渡辺寛子、「反ニュートリノの方向測定に向けたリチウム含有液体シンチレータの開発」、第14回 ICEPP シンポジウム、2008.2.18、白馬村
  23. 中島恭平、「KamLAND による低エネルギー太陽ニュートリノに向けた研究」、第14回 ICEPP シンポジウム、2008.2.18、白馬村
  24. I.Shimizu, “Status of KamLAND Anti-Neutrino Analysis and Future Prospects”, 6<sup>th</sup> symposium “Exploring New Science by Bridging Particle-Matter Hierarchy”, 13 December 2007, Sendai, Japan.
  25. Y.Kishimoto, “Status for Solar Neutrino Phase”, KEK theory symposium, 12 December 2007, Tsukuba, Japan.
  26. I.Shimizu, “Recent Results from KamLAND”, 21<sup>st</sup> workshop on Cosmic Neutrinos, 2 November 2007, Kashiwa, Japan.
  27. S.Yoshida, “KamLAND solar phase and Borexino result”, 21<sup>st</sup> workshop on Cosmic Neutrinos, 2 November 2007, Kashiwa, Japan.
  28. H.Watanabe, “R&D for possible future improvement of KamLAND”, 10<sup>th</sup> international conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics 2007, 14 September 2007, Sendai, Japan.
  29. K.Nakajima, “Quality Study of Purified Liquid Scintillator”, TAUP2007, 14 September 2007, Sendai, Japan.
  30. I.Shimizu, “KamLAND anti-neutrino status”, TAUP2007, 14 September 2007, Sendai, Japan.
  31. Y.Kishimoto, “KamLAND purification status”, TAUP2007, 12 September 2007, Sendai, Japan.
  32. I.Shimizu, “Present Status and Future Prospects of KamLAND”, International Workshop on Double Beta Decay and Neutrinos 2007, 12 June 2007, Osaka Japan.
  33. A.Suzuki, “Present Status and Future Outlook of Neutrino Mass and Oscillation Experiments”, International Nuclear Physics Conference, 4 June 2007, Tokyo, Japan.
- [その他]  
ホームページ等  
<http://www.awa.tohoku.ac.jp/RCNS/>
6. 研究組織
    - (1) 研究代表者  
井上 邦雄 (INOUE KUNIO)  
東北大学・大学院理学研究科・教授  
研究者番号：10242166
    - (2) 研究分担者
    - (3) 連携研究者  
榎本 三四郎 (ENOMOTO SANSHIRO)  
東北大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号：90400225  
池田 晴雄 (IKEDA HARUO)  
東北大学・大学院理学研究科・助教  
研究者番号：90400233